文章编号:1000-4939(2022)06-1007-07

电子辐照 PDMS 力学性能影响实验研究

邱剑[1,2],吕世豪[1],玛丽娅[3],师岩[1],高存法[1]

(1.南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室,210016 南京;2.韶关学院化学与土木工程学院,512005 韶关;3.中国科学院特殊环境功能材料与器件重点实验室 新疆电子信息材料与器件重点实验室 中国科学院新疆理化技术研究所,830011 乌鲁木齐)

摘 要:聚二甲基硅氧烷(PDMS)以其良好的延展性和机械性能,在柔性电子、柔性太阳电池、微流体芯片等领域取得了广泛的应用。PDMS 可用于航天复合材料和柔性展开机构中,而航天器在空间运行时,需要考虑空间辐照环境的长期作用。本研究针对 PDMS 受电子辐照作用后的力学性能变化开展研究:①首先将树脂和固化剂按不同配比混合,按国标进行了哑铃状 PDMS 拉伸试样的制备,进行了单轴拉伸试验;②将不同配比 PDMS 拉伸样品进行了不同剂量的电子辐照试验,并对辐照后样品进行了拉伸试验。采用扫描电子显微镜对辐照前后样品断口形貌进行了观测,并进行了元素成分分析;③基于 Neo-Hookean 模型对单轴拉伸的应力应变关系进行了推导,并与实验数据进行了对比。结果表明,电子辐照能显著影响 PDMS 的力学性能和表面形貌。辐照后的 PDMS 试样呈现硬化,弹性模量随辐照剂量增加而提高,而断裂伸长率随辐照剂量增加而减少。

关键词:辐照;PDMS;拉伸试验;Neo-Hookean 模型

中图分类号:O348 **文献标志码:**A **DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2022.06.001

Experimental study on the effect of electron irradiation on mechanical properties of PDMS

QIU Jian[1,2], LÜ Shihao[1], Maliya[3], SHI Yan[1], GAO Cunfa[1]

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 210016 Nanjing, China; 2. School of Chemistry and Civil Engineering, Shaoguan University, 512005 Shaoguan, China; 3. Key Laboratory of Functional Materials and Devices for Special Environments of Chinese Academy of Sciences, Xinjiang Key Laboratory of Electronic Information Materials and Devices, Xinjiang Technical Institute of Physics & Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 830011 Urumqi, China)

Abstract: Polydimethylsiloxane (PDMS) is widely used in flexible devices such as electronics, solar cells, and microfluidic chips, due to its distinguished ductility and mechanical properties. PDMS also has exploited its applications in space composite materials and flexible deployable mechanisms, where it is necessary to consider the long-term effects of the space irradiation environment on the materials. In this study, the mechanical properties of PDMS exposed to electron irradiation were studied: ①First, the resin and curing

收稿日期:2022-06-13 **修回日期:**2022-09-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. U1937601;51921003);机械结构力学及控制国重实验室基金资助项目(No. MCMS-I-0221Y01)
通信作者:师岩。E-mail:yshi@nuaa.edu.cn
引用格式:邱剑,吕世豪,玛丽娅,等. 电子辐照 PDMS 力学性能影响实验研究[J]. 应用力学学报,2022,39(6):1007-1013.
QIU Jian, LÜ Shihao, Maliya, et al. Experimental study on the effect of electron irradiation on mechanical properties of PDMS[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(6):1007-1013.

agent were mixed in designed proportions and dumbbell-shaped tensile specimens of PDMS were produced according to the national standard. Then, a uniaxial tensile test was carried out. ②Tensile testing was carried out on the specimens exposed to different doses of high-energy electron irradiation. Scanning electron microscope (SEM) was used to observe the fracture morphology of the tensile specimens both with or without irradiation and analyze the elemental composition. ③Based on the Neo-Hookean model, the stress-strain relationship of uniaxial tension was derived from the energy density function by fitting it from the experimental data. The results demonstrate that electron irradiation has a significant effect on the mechanical properties and surface morphology of PDMS. The irradiated PDMS specimen appears to be hardened, and its elastic modulus increases with the increase of radiation, while an opposite trend is found at the elongation at break.

Key words: irradiation; PDMS; tensile test; Neo-Hookean model

随着航空航天领域一系列重大工程如嫦娥探月、天问火星探测、天宫号空间站建设、深空探测等稳步开展,中国正逐步实现航天强国梦。航天任务中的科学探索和技术验证需要航天材料的支撑,因此探索航天新型高性能材料,研究其在空间环境中的变化规律具有重要意义。聚二甲基硅氧烷(PDMS)由于具有良好的延展性、光学和机械性能,在柔性电池、柔性电子皮肤、微流体芯片等领域应用广泛[1-3]。同时,PDMS 材料还具有透光性好、性能稳定、温度适应范围广等特点,具有巨大的航天应用潜力。

航天器在太空中受到复杂的空间辐射环境影响,在地球附近的近层宇宙空间中存在范艾伦辐射带[4],其中包含的高能粒子对航天材料的性能有重大影响。根据现有报道,已有相关的石墨烯-PDMS 复合材料制备的微应变和温度传感器应用于航天设备中[5]。此外,PDMS 及其复合材料在航天员空间辐射防护[6]以及空间柔性展开机构上[7]均具备良好的应用前景。由于航天器需要在太空中长期服役,且造价昂贵,一旦零部件或者材料发生失效将会引发极大的经济和社会损失。因此,有必要对 PDMS 受辐照作用的性能影响进行研究。

空间辐射对航天器及材料在轨长期可靠运行影响重大,如何提高航天材料的抗辐射性能及可靠运行能力一直都是国内外科学家关注的关键技术问题[8-9]。空间高能粒子辐射带主要包括质子、电子及少量重离子等,由于地面重离子辐照试验受限于放射性作用和设备造价,实现起来存在一定困难。从国内研究来看,航天材料的辐照试验以电子辐照试验居多。哈尔滨工业大学的吴宜勇团队和北京卫星环境工程研究所的沈自才团队对航天材料力学性能受电子辐照的影响进行了一系列研究,包括 PI 纤维、Kapton/Al 薄膜、三结太阳电池等[10-12]。此外,中国科学院新疆理化技术研究所也在航天材料电子辐照试验方面做了很多优秀工作[13-14]。

国外的研究机构针对空间辐照作用对材料的影响进行了充分地研究。匈牙利科学院核研究所的 Huszank 等[15]研究了离子(H^+)辐照对 PDMS 表面弹性、纳米结构以及化学变化的影响,并利用 AFM 测量了弹性常数。印度 KIIT 的 Giri 等[16]研究了电子辐照对 LLDPE 和 PDMS 混合物的结晶度、动态模量和介电强度等的影响,并讨论了改变混合比例所引起的变化。印度 KIIT 的 Hota 等[17]对不同混合比的 AEM 和 MPU 混合物进行了不同剂量的电子辐照,对辐照引起的三维交联采用 SEM、FTIR 等设备进行了实验观测。而文献[18-20]对类似于 PDMS 材料的混合物在电子辐照或者 γ 射线辐照作用下表面性能、结构性能等的改变进行了研究。

然而,针对不同配比、不同固化温度的 PDMS 材料受电子辐照作用及其力学性能影响,目前还少有研究。

1 PDMS 试样制作

PDMS 拉伸试样采用陶氏化学 SYLGARD 184 制备。制作流程如下所示:①固化剂和基体分别称重,按照质量 1∶5 ~ 1∶25 的比例进行调配;②放置真空箱中抽真空排除气泡;③按国标《GB/T 528—2009 硫化橡胶或热塑性橡胶拉伸应力应变性能的测定》中 1 型哑铃状试样制作模具,将已排气的材料注入模具中;④平放静置于干燥箱,平缓升温至 65 ℃,静置 4 h 进行固化;⑤将固化后的拉伸试样从

模具中取出，将边角处理平齐。



图 1　PDMS 拉伸试样制作流程

Fig. 1　Fabrication process of PDMS tensile specimen

本次试验中固化剂和基体质量配比共采取 5 种配比，如表 1 所示。

表 1　固化剂和基体质量配比

Tab. 1　Weight ratio of curing agent versus base

SYLGARD 184	质量配比				
固化剂	1	1	1	1	1
基体	5	10	15	20	25

2　电子辐照实验及模拟

2.1　电子辐照实验

电子辐照实验在中国科学院新疆理化技术研究所的高频高压型电子加速器上进行。设备型号为：俄罗斯 ELV-8 II。电子束辐照能量为 1 MeV，注量率为 1×10^{11} e · cm^{-2} · s^{-1}。

表 2　电子辐照实验方案

Tab. 2　Experimental scheme of electron radiation

辐照剂量/(e · cm^{-2})	不同剂量下取出 PDMS 样品编号		
1×10^{14}	1∶15-1	1∶20-4	1∶25-1
5×10^{14}	1∶15-2	1∶20-5	1∶25-2
1×10^{15}	1∶15-3	1∶20-6	1∶25-3

2.2　CASINO 电子辐照模拟

采用 CASINO 软件对 1 MeV 电子辐照过程进行了模拟，三维建模如图 2(a)所示，PDMS 材料放置于铝板上，两者厚度均为 2 mm。电子束从上往下入射，设定入射电子 10 000 个。根据模拟结果得知，电子在 PDMS 材料中大部分被吸收，同时电子能量衰减后有部分能量散射出去，不同阶段能量散射的详细分布见图 2(b)所示。

2.3　辐照前后断口形貌和成分对比

选取质量配比为 1∶15 的辐照前后两个 PDMS 试样拉断之后的样品进行断口表面形貌观测，其中图 3(a)为没有辐照的样品，图 3(b)为接受了 1×10^{15} e·cm^{-2} 剂量电子辐照的样品。对断口进行喷金粉后，采用 Bruker MAIA3 扫描电子显微镜观测，得到的断口表面形貌如图 3 所示。从图中可以看出，受辐照后的 PDMS 样品形貌发生较大变化，呈现显著粗糙。

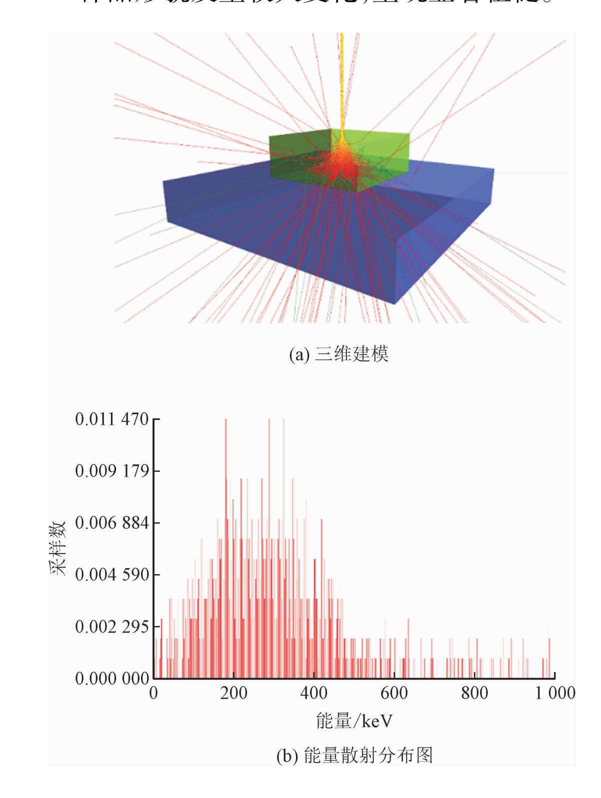


图 2　CASINO 电子辐照模拟

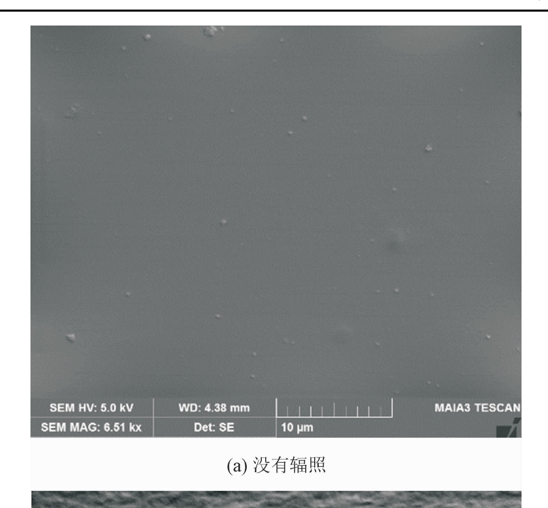
Fig. 2　Electron irradiation simulation by CASINO

采用 Bruker MAIA3 扫描电子显微镜对两个样品进行能谱分析，得到的元素成分对比如表 3 所示。由表 3 可以看出，电子辐照后元素硅和元素碳的质量占比发生改变。可能的原因是电子辐照对 PDMS 中的$(C_2H_6OSi)_n$ 分子链产生影响，使其发生断裂或者交联。导致碳元素富集，而硅元素发生析出，并进一步影响材料的宏观力学性能。

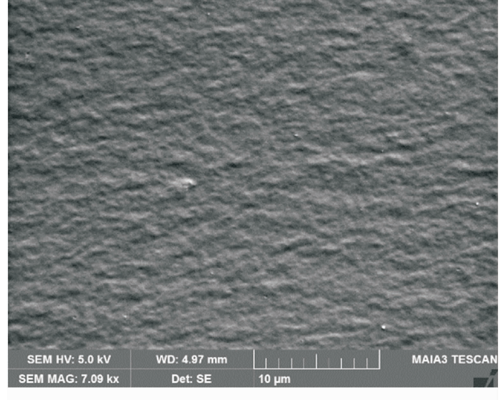
表 3　有无辐照样品元素成分对比

Tab. 3　Comparison of element composition with and without irradiation

没有辐照样品		电子辐照后样品	
元素	归一化质量/%	元素	归一化质量/%
硅	43.30	硅	40.20
碳	35.52	碳	38.40
氧	21.19	氧	21.40



(a) 没有辐照



(b) 接受辐照后

图3 有无辐照样品表面形貌对比

Fig. 3 Comparison of surface morphology with and without irradiation

3 力学实验及理论推导

3.1 单轴拉伸实验方案

PDMS试样的单轴拉伸试验采用Instron 5943试验装置进行，同时在拉伸试样上喷散斑，利用iMETRUM非接触式应变位移视频测量分析仪对拉伸过程进行视频测量，如图4所示。为统一起见，拉伸试验过程中均采用10 N的力传感器，拉伸速率为500 mm · min^{-1}。

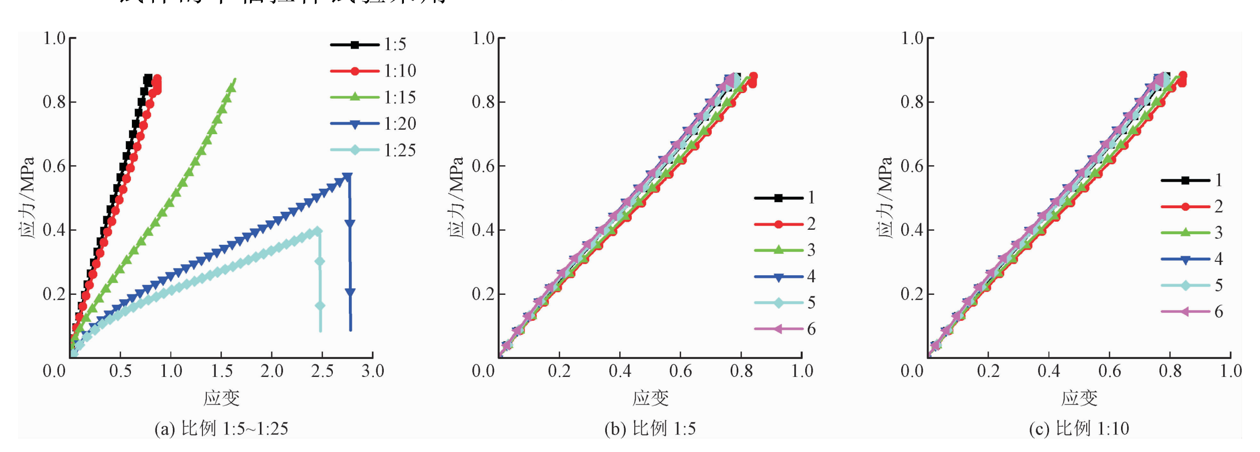


图4 拉伸试验及视频测量

Fig. 4 Tensile test and video recording

3.2 实验数据处理

图5所示为：(a)固化剂与基体质量配比1∶5～1∶25拉伸应力-应变曲线；(b)固化剂与基体质量配比1∶5的6个PDMS试样拉伸应力-应变曲线；(c)固化剂与基体质量配比1∶10的6个PDMS试样拉伸应力-应变曲线。由图5(a)可知，PDMS固化剂与基体质量配比由1∶5向1∶25变化时，其弹性模量减小，且弹性模量减小的趋势与配比并不成线性关系。此外，固化剂和基体质量配比对PDMS断裂伸长率影响较大，PDMS固化剂与基体质量配比由1∶5向1∶25变化时，其断裂伸长率增加。同时，对于同等配比的PDMS试件，应力-应变曲线基本接近。



(a) 比例1:5~1:25　(b) 比例1:5　(c) 比例1:10

图5 固化剂与基体不同质量配比下PDMS拉伸试样应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves for PDMS tensile specimen with different ratios between curing agent and base

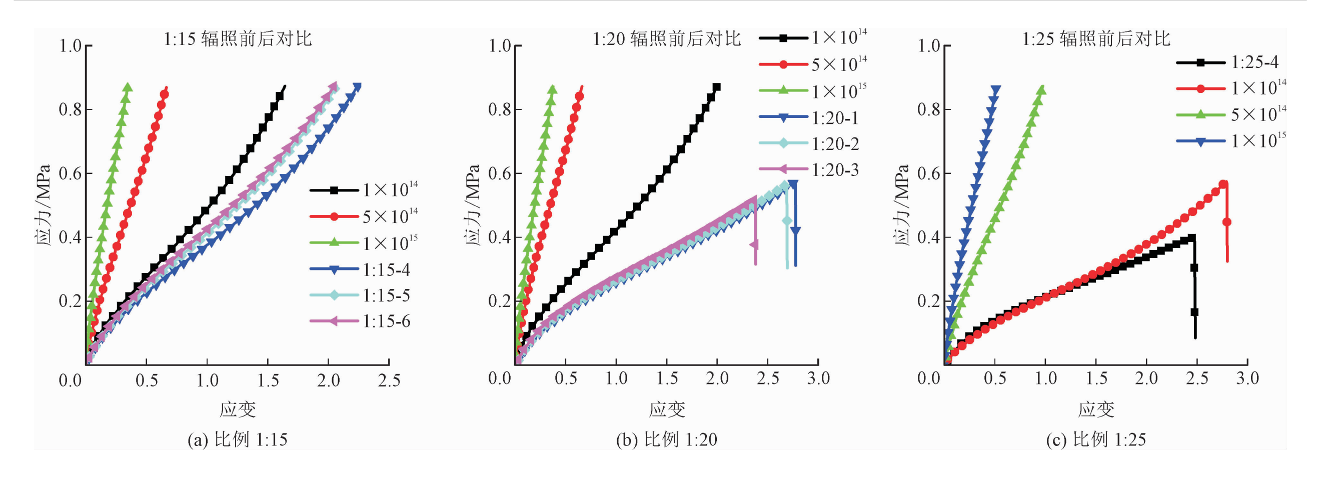


图 6　固化剂与基体不同质量配比下 PDMS 拉伸试样受辐照应力-应变曲线对比

Fig. 6　Stress-strain curves for PDMS tensile specimen after irradiation

图 6 所示为:(a)固化剂与基体质量配比为1∶15 的 PDMS 拉伸试样受不同剂量辐照与没有辐照试样应力-应变曲线对比;(b)配比 1∶20 的 PDMS 拉伸试样有无辐照应力-应变曲线对比;(c)配比1∶25 的 PDMS 拉伸试样有无辐照应力-应变曲线对比。可得知,不同比例 PDMS 试样受电子辐照后力学性能影响明显,呈现"硬化"现象。且随着电子辐照剂量的增加,弹性模量显著增加,如表 4 所示,但并不成线性关系。与之相反的是,断裂伸长率随着辐照剂量的增加而减少。

表 4　辐照剂量对弹性模量影响

Tab. 4　Effect of radiation dose on elastic modulus

比例	辐射剂量			
	未辐照	1×10^{14}	5×10^{14}	1×10^{15}
1∶15	0.581	0.881	1.686	3.018
1∶20	0.478	0.796	1.758	2.759
1∶25	0.406	0.375	1.183	2.08

3.3　力学性能分析

为了定量分析辐照对 PDMS 宏观机械性能的影响,利用超弹性力学模型,对其材料力学性能进行表征。考虑经典 Neo-Hookean 超弹性模型,其能量密度函数为关于 3 个应变不变量的函数,即

$$U = U(I_1, I_2, I_3) \tag{1}$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2,\quad I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2,\quad I_3 = \lambda_1^2\lambda_2^2\lambda_3^2 \tag{2}$$

其中 I_1、I_2、I_3 分别为第一、第二、第三应变不变量。

$$\lambda_i = 1 + \varepsilon_i \tag{3}$$

其中:λ_i 为主方向伸长比;ε_i 为主方向应变。

主应力 T_{ij}表达式为

$$T_{ij} = \frac{\partial U}{\partial \lambda_{ij}} = \frac{\partial U}{\partial I_1}\frac{\partial I_1}{\partial \lambda_{ij}} + \frac{\partial U}{\partial I_2}\frac{\partial I_2}{\partial \lambda_{ij}} + \frac{\partial U}{\partial I_3}\frac{\partial I_3}{\partial \lambda_{ij}} \tag{4}$$

$$\sigma_1 = 2\lambda_1\left[\frac{\partial U}{\partial I_1} + \frac{\partial U}{\partial I_2}(\lambda_2^2 + \lambda_3^2) + \frac{\partial U}{\partial I_3}\lambda_2^2\lambda_3^2\right] \tag{5}$$

基于 Neo-Hookean 模型,应变能密度函数表达式为

$$U = C_1(I_1 - 3) \tag{6}$$

$$C_1 = \frac{\mu_1}{2} = \frac{\mu}{2} \tag{7}$$

其中 μ 为剪切模量。

对于不可压缩材料

$$J = \det(F) = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 = 1 \tag{8}$$

单轴拉伸有

$$\lambda_1 = 1 + \varepsilon_1, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_1^{-\frac{1}{2}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} \tag{9}$$

3 个不变量可分别表示为

$$I_1 = \lambda_1^2 + 2\lambda_1^{-1} = (1 + \varepsilon_1)^2 + 2\frac{1}{1 + \varepsilon_1} \tag{10}$$

$$I_2 = 2\lambda_1^2\lambda_1^{-1} + \lambda_1^{-2} = 2\lambda_1 + \lambda_1^{-2} \tag{11}$$

$$I_3 = \lambda_1^2\lambda_1^{-1}\lambda_1^{-1} = 1 \tag{12}$$

将不变量表达式代入式(5)中,得单轴拉伸应力-应变表达式为

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= \frac{\partial U}{\partial \lambda_1} = \frac{\partial U}{\partial I_1}\frac{\partial I_1}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial U}{\partial I_2}\frac{\partial I_2}{\partial \lambda_1} + \frac{\partial U}{\partial I_3}\frac{\partial I_3}{\partial \lambda_1} \\ &= \frac{\partial C_1(I_1 - 3)}{\partial I_1}\frac{\partial I_1}{\partial \lambda_1} = 2C_1\left(\lambda_1 - \frac{1}{\lambda_1^2}\right) \\ &= \mu\left[1 + \varepsilon_1 - \frac{1}{(1 + \varepsilon_1)^2}\right]\end{aligned} \tag{13}$$

将由 Neo-Hookean 模型推导得到的应力-应变关

系式(13)分别与几种不同配比的 PDMS 拉伸实验结果进行对比,可得知曲线趋势吻合较好,并且在不同比例下都有适用性,如图 7 所示。

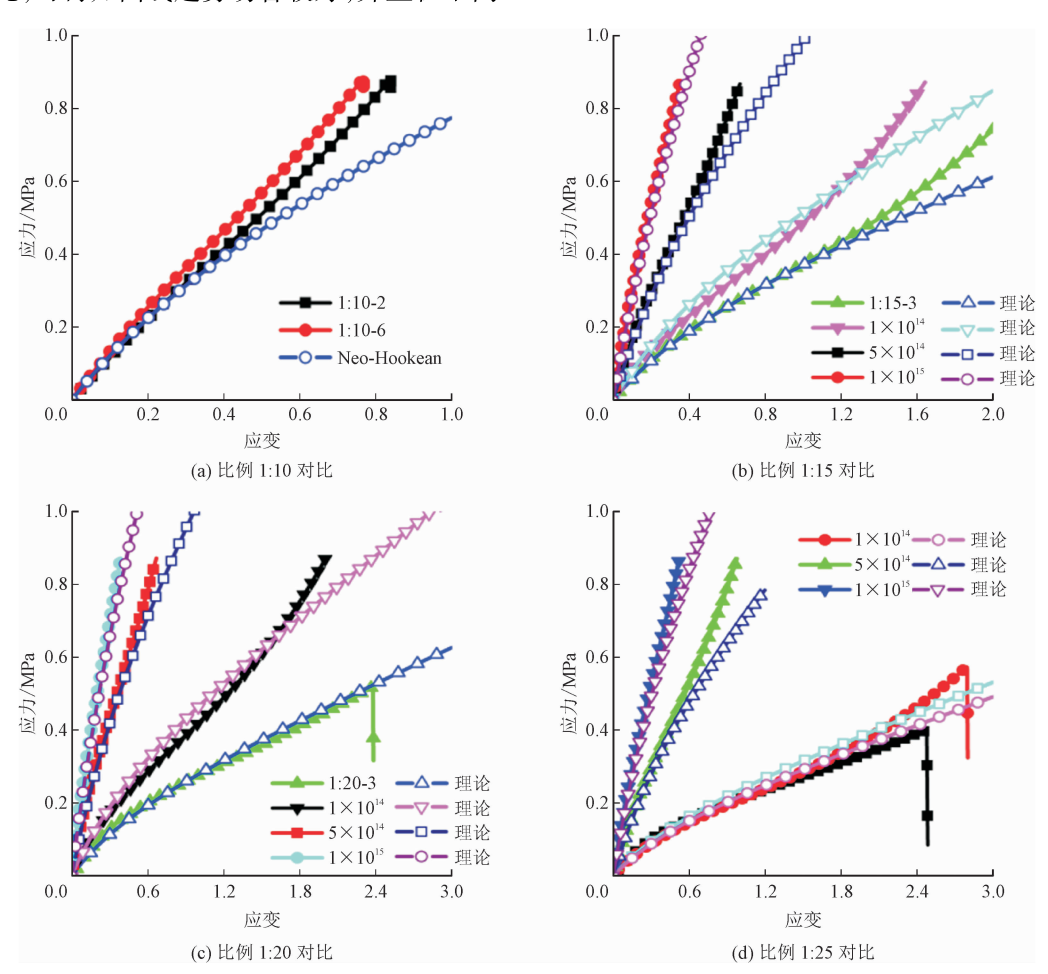


图 7 理论与实验应力-应变曲线对比

Fig. 7 Comparison of theoretical and experimental stress-strain curves

4 结 论

电子辐照对 PDMS 材料的力学性能和表面形貌等影响较大,辐照后样品呈现“硬化”现象,且随着入射剂量的增加呈现规律变化,长期空间服役需要关注。结论如下。

1)不同比例 PDMS 试样受辐照后弹性模量都有增加,且与电子辐照剂量的增加不成线性关系,同时对断裂伸长率影响较大。

2)电子辐照可能使 PDMS 分子链发生交联或者断裂,引发元素成分含量的变化,进一步影响力学性能。

3)将几种不同配比的 PDMS 辐照前后拉伸实验结果与 Neo-Hookean 理论模型推导进行对比,应力-应变曲线趋势吻合较为良好。

致 谢

本课题受到国家自然科学基金-航天先进制造技术研究联合基金(No. U1937601)、国家自然科学基金创新群体项目(No. 51921003)和机械结构力学及控制国家重点实验室(MCMS-I-0221Y01)资助。感谢南京工业大学王爽老师对实验工作的支持。

参考文献:

[1] DRUPITHA M P, BANKOTI K, PAL P, et al. Morphology-induced physico-mechanical and biological characteristics of TPU-PDMS blend scaffolds for skin tissue engineering applications[J]. Journal of biomedical materials research. Part B, Applied biomaterials, 2019, 107(5):1634-1644.

[2] HUANG J, HU Y, BAI Y, et al. Novel solar membrane distillation enabled by a PDMS/CNT/PVDF membrane with localized heating

[J]. Desalination,2020,489:114529.

[3] LI Z,NAMBIAR S,ZHENG W,et al. PDMS/single-walled carbon nanotube composite for proton radiation shielding in space applications[J]. Materials letters,2013,108:79-83.

[4] JOSEPH J,JAYNES A N,BAKER D N,et al. Van Allen belt punctures and their correlation with solar wind,geomagnetic activity,and ULF waves[J]. Journal of geophysical research: Space physics,2021,126(1):e2020JA028679-1-e2020JA028679-11.

[5] OPPILI P L,SREELAL P S,SAMBANDAN S. Micro-strain and temperature sensors for space applications with Graphite-PDMS composite[C]//Proceedings of 2019 IEEE International Conference on Flexible and Printable Sensors and Systems. Glasgow: IEEE,2019.

[6] 胡文涛,周光明. 中国空间辐射生物研究面临的挑战和机遇[J]. 科学通报,2019,64(36):3824-3829.
HU Wentao,ZHOU Guangming. Challenges and opportunities for the space radiobiology research in China[J]. Chinese science bulletin,2019,64(36):3824-3829(in Chinese).

[7] 张豆,刘彦菊,冷劲松. 纤维增强形状记忆聚合物复合材料及其航天应用[J]. 复合材料学报,2021,38(3):698-711.
ZHANG Dou,LIU Yanju,LENG Jinsong. Fiber reinforced shape memory polymer composites and their applications in aerospace[J]. Acta materiae compositae Sinica,2021,38(3):698-711(in Chinese).

[8] 沈自才,闫德葵. 空间辐射环境工程的现状及发展趋势[J]. 航天器环境工程,2014,31(3):229-240.
SHEN Zicai,YAN Dekui. Present status and prospects of space radiation environmental engineering[J]. Spacecraft environment engineering,2014,31(3):229-240(in Chinese).

[9] 陈伟,杨海亮,郭晓强,等. 空间辐射物理及应用研究现状与挑战[J]. 科学通报,2017,62(10):978-989.
CHEN Wei,YANG Hailiang,GUO Xiaoqiang,et al. The research status and challenge of space radiation physics and application[J]. Chinese science bulletin,2017,62(10):978-989(in Chinese).

[10] 琚丹丹,王馨敏,孙承月,等. PI 纤维在空间带电粒子辐照下的力学性能损伤[J]. 装备环境工程,2020,17(3):1-7.
JU Dandan,WANG Xinmin,SUN Chengyue,et al. Mechanical Properties of polyimide fibers under the irradiation of space charged particles[J]. Equipment environmental engineering,2020,17(3):1-7(in Chinese).

[11] 沈自才,牟永强,吴宜勇. 电子辐照 Kapton/Al 薄膜力学性能退化规律与机理研究[J]. 装备环境工程,2015,12(3):42-44.
SHEN Zicai,MU Yongqiang,WU Yiyong. Study on the mechanical property degradation pattern and mechanism of the mechanical property of Kapton/Al film by electron radiation[J]. Equipment environmental engineering,2015,12(3):42-44(in Chinese).

[12] 付帅,郭宏亮,江濠鹏,等. 三结太阳电池高能电子损伤模拟及仿真分析[J]. 航天器环境工程,2016,33(4):392-398.
FU Shuai,GUO Hongliang,JIANG Haopeng,et al. Simulation of high energy electron damage of triple junction solar cell[J]. Spacecraft environment engineering,2016,33(4):392-398(in Chinese).

[13] 颜平远,涂洁磊,艾尔肯·阿不都瓦衣提,等. 基于布拉格反射器的 GaInP/Ga(In)As/Ge 三结太阳电池电子辐照性能[J]. 光学学报,2020,40(16):212-219.
YAN Pingyuan,TU Jielei,AIERKEN Abuduwayiti,et al. Electron irradiation performance of GaInP/Ga(In)As/Ge triple junction solar cell based on bragg reflector[J]. Acta optica Sinica,2020,40(16):212-219(in Chinese).

[14] 雷琪琪,郭旗,艾尔肯·阿不都瓦衣提,等. GaAsN/GaAs 量子阱在 1 MeV 电子束辐照下的退化规律[J]. 发光学报,2020,41(5):603-609.
LEI Qiqi,GUO Qi,AIERKEN Abuduwayiti,et al. Degradation of GaAsN/GaAs Quantum Well Under 1 MeV Electron Beam Irradiation[J]. Chinese journal of luminescence,2020,41(5):603-609(in Chinese).

[15] HUSZANK R,BONYÁR A,KÁMÁN J,et al. Wide range control in the elastic properties of PDMS polymer by ion beam (H^+) irradiation[J]. Polymer degradation and stability,2018,152:253-258.

[16] GIRI R,NASKAR K,NANDO G B. Effect of electron beam irradiation on dynamic mechanical,thermal and morphological properties of LLDPE and PDMS rubber blends[J]. Radiation physics and chemistry,2012,81(12):1930-1942.

[17] HOTA N K,KARNA N,TRIPATHY D K,et al. Exploring the effect of electron beam on swelling,gel fraction,mechanical and thermal properties of ethylene acrylic elastomer/millable polyurethane rubber blends[J]. Plastics,rubber & composites,2019,48(6):248-255.

[18] DUTTA J,CHATTERJEE T,RAMACHANDRAN P,et al. Exploring the influence of Methylene Diphenyl Diisocyanate as a modifier for ethylene vinyl acetate/thermoplastic polyurethane blends[J]. Polymer-plastics technology and engineering,2018,57(16):1642-1656.

[19] AKIYAMA Y. Influence of poly(N-isopropylacrylamide)(PIPAAm) graft density on properties of PIPAAm grafted poly(dimethylsiloxane) surfaces and their stability[J]. Heliyon,2021,7(3):e6520.

[20] SATTI A J,RESSIA J A,MOLINARI E,et al. Metallocenic polyolefin composites with siloxane polymer additives[J]. Radiation physics and chemistry,2018,151:205-210.

（编辑　张璐）